

## MONITOROWANIE STANU TORU POJAZDAMI SZYNOWYMI WYPOSAŻONYMI W CZUJNIKI PRZYSPIESZEŃ NA KORPUSACH ŁOŻYSK ZESTAWÓW KOŁOWYCH<sup>1</sup>

---

### Roman Bogacz

prof. dr. hab., Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel.: +48 12 628 2358

---

### Włodzimierz Czyczula

prof. dr. hab. inż., Katedra Infrastruktury Transportu Szynowego i Lotniczego, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel.: +48 12 628 2358, e-mail: czyczula@pk.edu.pl

### Jacek Konop

mgr inż., dyrektor ds. rozwoju, PESA Bydgoszcz S.A.

---

**Streszczenie.** *Praca dotyczy zagadnienia monitorowania stanu toru czujnikami przyspieszenia lub siły w celu wykrycia ewentualnych uszkodzeń elementów toru oraz oceny jakości oddziaływania pojazdu szynowego z torem. Na podstawie wskazań czujników oddziaływania pojazdu z torem przy zadanej prędkości jazdy podejmuje się próbę oceny uszkodzeń i klasyfikacji stanu toru oraz łożysk.*

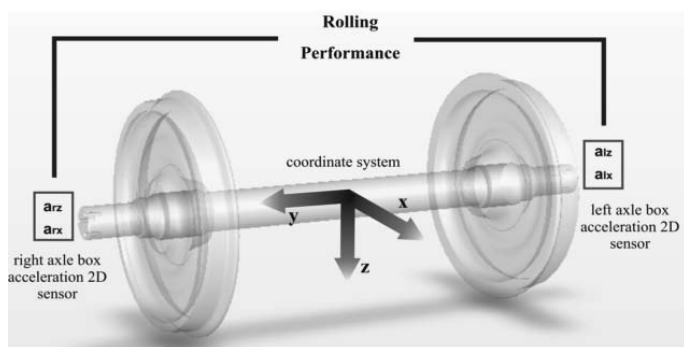
**Słowa kluczowe:** *monitorowanie stanu toru, dynamika układu pojazd-tor, wykojenie*

### 1. Wstęp

Wydaje się zasadne, że monitorowanie stanu toru i stanu pojazdu są w pewnym sensie ze sobą sprzężone. W szczególności, jeżeli pomiar oddziaływania jest dokonywany na obudowie łożyska zastawu kołowego. Jak wynika z przeprowadzonych wstępnych badań symulacyjnych i doświadczalnych pomiar parametrów charakteryzujących stan toru został ograniczony do wykorzystania sygnału akustycznego, tj. do pomiaru trzech składowych przyspieszenia przy pomocy czujników umieszczonych pod pokrywą łożysk lub na powierzchni zewnętrznej pokrywy (takie rozwiązania podane zostały na rysunku 1). Do oceny stanu łożysk zestawów kołowych na podstawie pomiaru sił można wykorzystać usytuowanie czujników w rejonie pierścienia zewnętrznego łożyska i korpusu.

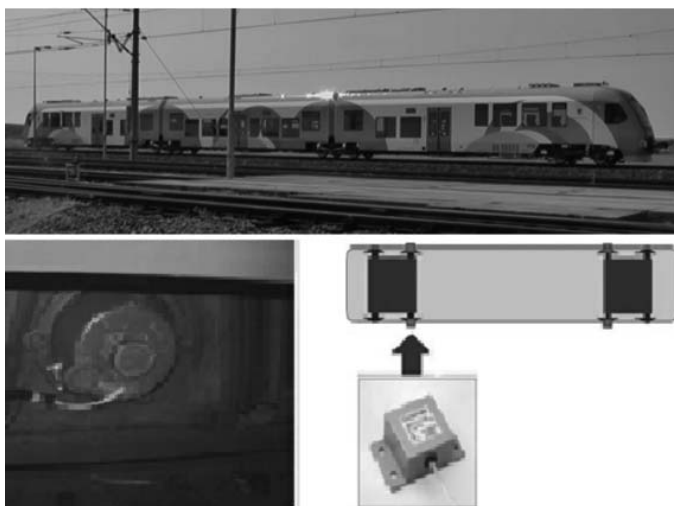
---

<sup>1</sup> Wkład autorów w publikację: Bogacz R. 40%, Czyczula W. 40%, Konop J. 20%



Rys. 1. Schemat wyposażenia zestawu kół w czujniki przyspieszenia (Austria, Niemcy)

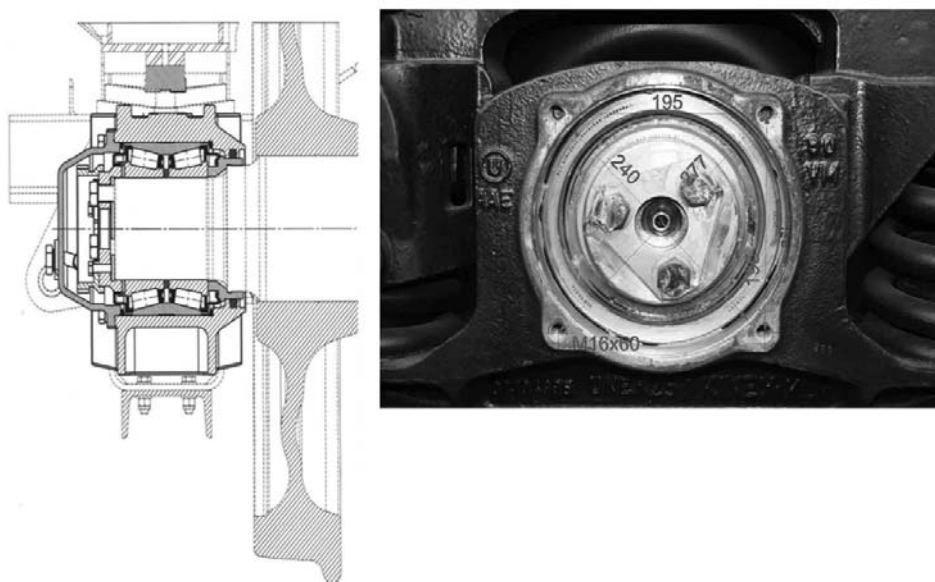
Na rysunku 1 pokazano schemat umieszczenia czujników przyspieszenia stosowany przez badaczy niemieckich i austriackich, który został uzupełniony w Polsce o pomiar trzeciej składowej przyspieszenia (w kierunku wzdłużnym). Schemat rozmieszczenia czujników przyspieszenia na zestawach szynobusu firmy PESA ilustruje schemat na rys. 2.



Rys. 2. Szynobus F-my PESA, wyposażony w czujniki do monitorowania stanu pojazdu i toru, umieszczone na korpusach łożysk zestawów kołowych

Wzrost wibracji, który może być spowodowany uszkodzeniem łożyska w przypadku przekroczenia niebezpiecznego poziomu powinien być przekazany maszyniście lub operatorowi, a w przypadku krytycznym powinien spowodować zatrzymanie pociągu. W celu oceny przebiegu zjawisk związanych z monitoringiem przeprowadzono symulacje ich przebiegu, a przykładowe wyniki podano w następnej części pracy. Analiza dotyczy symulacji procesów o różnym czasie trwania i różnej intensywności źródła drgań i źródła ciepła. Ponieważ poza oceną stanu toru, czujniki umieszczone na korpusach łożysk pozwalają wykryć również uszkodzenie zestawu kołowego, które może dotyczyć zarówno

uszkodzeń łożysk, jak i osi (np. przez DB prowadzone są badania nad akustycznym monitoringiem pęknięć osi), sygnał przyspieszeń powinien mieć odpowiednio duży zakres częstotliwości. Na rys. 3 pokazano szkic korpusu łożyska zestawu kołowego z widokiem korpusu po zdjęciu pokrywy, na której można również zainstalować czujniki przyspieszeń (przykładem takiego rozwiązania jest rozwiązanie [1] realizowane przez Instytut Kolejnictwa (CNTK).

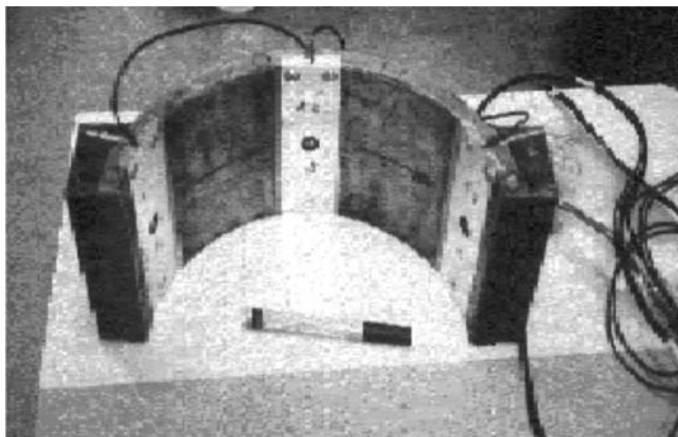


Rys. 3. Szkic korpusu łożyska i jego widok po zdjęciu pokrywy

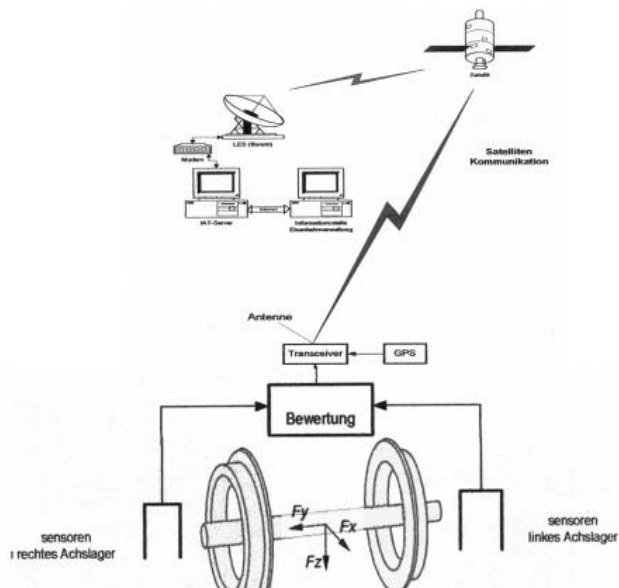
Na rysunku 4 pokazane zostały czujniki piezoelektryczne do pomiaru sił działających na obudowę łożyska, który umożliwił bardziej precyzyjny pomiar obciążeń. Jednak tego typu czujnik jest dużo droższy i z tego względu nie jest powszechnie stosowany.

Do zadań monitoringu toru należy określenie usterek ich lokalizacji przestrzennej oraz ich zmian umożliwiających prognozowanie ewolucji oraz wynikające z tego zagrożenia. Ocena stanu toru dotyczy różnych jego elementów. Są to m. in. takie elementy jak: odcinki proste, łuki, rozjazdy, przepusty, mosty i inne. Usterki występujące niezależnie od wymienionych już elementów to: pęknięcia szyn, pęknięcia podkładów, usterki węzłów przytwierdzenia, wadliwe podbicie i inne. Lokalizacja i rodzaj usterki toru, parametry pomiaru (data, prędkość) mogą być przekazywane systemem, który został zaproponowany w badaniach z firmą PESA Bydgoszcz. Schemat układu zbierania danych ilustruje rys. 5. Mierzone sygnały w systemie pomiaru przyspieszeń z korpusu łożyska powinny umożliwić diagnostykę łożyska (osi) oraz określenie stanu toru, tj. oceny globalnej oraz wybranych parametrów toru (szyn). Sygnały akustyczne powinny być przesyłane do wielokanałowego wzmacniacza określonego typu oraz przy pomocy układu pokazanego na rys. 5 przekazane do serwera centrum informacyjnego. Sygnały

te powinny mieć możliwość rejestrowania cyfrowo zestawem – przetwornik z komputerem przenośnym lub komputerem pokładowym. Rejestrator cyfrowy programowany za pomocą programu komercyjnego winien umożliwiać, między innymi, wizualizację przebiegów po każdej próbie podczas testów, co pozwala na weryfikację i ocenę wybranego programu. Program powinien umożliwiać, między innymi, ustawienie częstości próbkowania, zakresów pomiarowych parametrów sterujących pomiarem oraz uzależnienie niektórych parametrów od prędkości jazdy i wyłączenie pomiarów np. przy prędkości mniejszej od 15 km/godz.



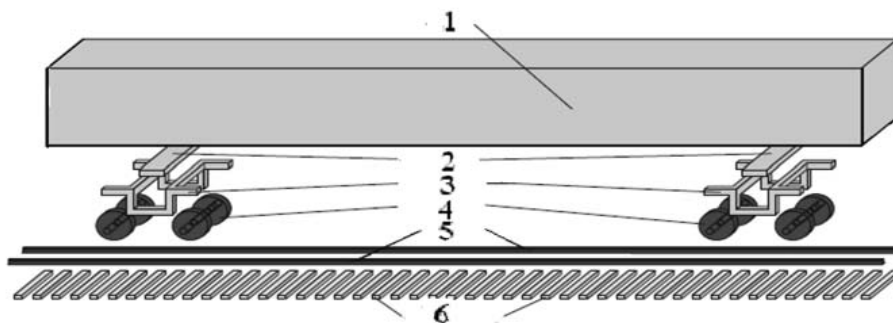
Rys. 4. Układ czujników do potrójnego pomiaru odkształceń (sił) umieszczony na zewnętrznym pierścieniu w korpusie łożyska zestawu kołowego pojazdu szynowego



Rys. 5. System zbierania danych i przekazywania do serwera z wykorzystaniem GPS przez firmy PESA i IAT {1}

## 2. Badania symulacyjne

Do badań symulacyjnych stanu toru wykorzystano model układu pojazd szynowy-tor przedstawiony na rys. 6, pozwalający na ocenę oddziaływania pojazdu z torem. Układ składa się z pudła wagonu (1), belek bujających (2), ram wózka (3), zestawów kołowych (4), szyn (5) oraz podkładów (6).



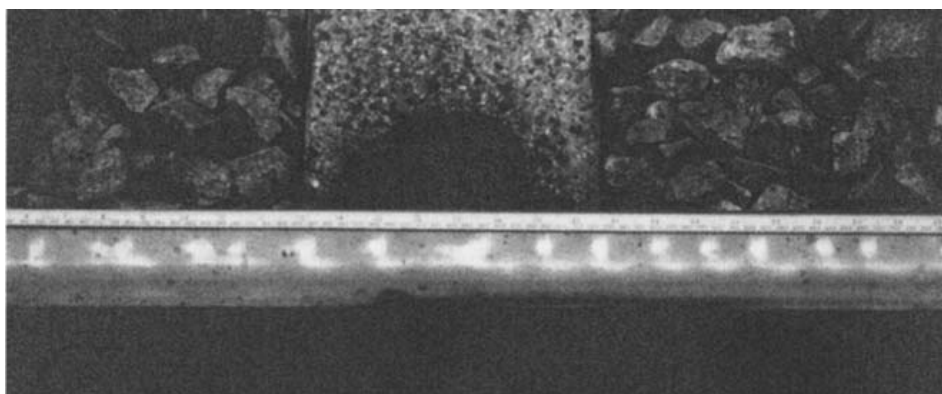
Rys. 6. Schematyczny model oddziaływania pojazdu z torem

Jednym z celów badań symulacyjnych jest wybranie odpowiedniej lokalizacji czujników umożliwiającej poprawną ocenę stanu toru. Inną ocenę otrzymamy umieszczając czujniki na podłodze pudła wagonu – bardziej przydatną do określenia komfortu jazdy, a inną na korpusach łożysk zestawów kołowych lepiej ilustrujący stan utrzymania lub względy bezpieczeństwa jazdy. Badania symulacyjne umożliwiają prognozę usterek, które mogą być pomierzone sygnałem akustycznym. Rezultaty wybranych badań symulacyjnych zawiera m. in. praca [3].

## 3. Monitorowanie stanu toru, geometria, zużycie

Pojazdy szynowe w czasie ruchu obciążane są siłami dynamicznymi pochodzącymi od kinematycznego wymuszenia imperfekcjami toru. Siły te generowane są przez geometryczne nierówności toru oraz zmienne parametry lepko-sprężystego podparcia w węzłach przytwierdzenia i podkładów. W przypadku pojazdów szynowych mogą to być istotnie różniące się parametry, zależne od pory roku, opadów, temperatury, itp. W tej części opracowania zostaną wykorzystane badania dotyczące wymuszeń kinematycznych drgań pojazdów szynowych i opracowywania zarejestrowanych wyników.

Geometryczne nierówności toru modelowane są zwykle za pomocą stacjonarnych, ergodycznych procesów przypadkowych. Wyjątek stanowią okresowe nierówności, takie jak feliste zużycie, które bardziej precyzyjnie nazywa się korugacją lub falami poślizgowymi (ang. corrugation, slip waves). Ze względu na małe amplitudy drgań obciążenie dynamiczne zespołów układów jezdnych pojazdów i szyn są w kraju lekceważone pomimo, że powodują często ponad dwukrotny wzrost sił kontaktowych.



Rys. 7. Faliste zużycie (korugacja szyny kolejowej) o amplitudzie około  $50 \mu\text{m}$  i długości fali  $\lambda = 50 \text{ mm}$

Fale poślizgowe występują głównie na jednej z szyn (odciążonej) toru o ciasnych łukach. Ich obraz ilustruje rys. 8. W dynamice pojazdów szynowych zagadnienia z zakresu drgań układów liniowych badane są zwykle w dziedzinie częstości. W przypadku modeli reprezentowanych przez liniowe równania różniczkowe charakterystykami są funkcje korelacyjne i gęstości widmowe.

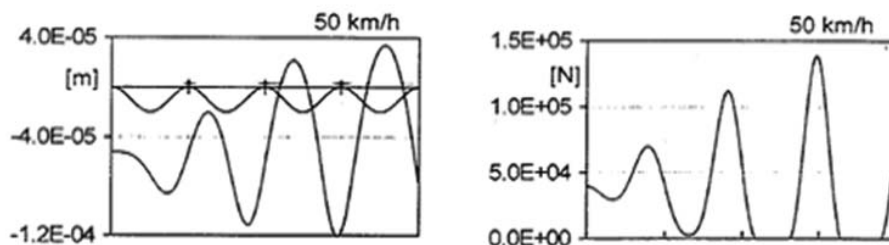


Rys. 8. Fale poślizgowe na szynach torów o ciasnych łukach (długość fali około  $120 \text{ mm}$ , amplituda przekraczająca  $300 \mu\text{m}$ )

Poza korugacją i falami poślizgowymi, które oceniane będą w szczególny sposób, miary opracowane z wykorzystaniem gęstości widmowych nadają się do oceny globalnej stanu toru. Poza charakterystycznym parametrem stanu toru system monitorowania powinien mieć możliwość sygnalizowania usterek niebezpiecznych grożących wykolejeniem.

W przypadku korugacji (falistego zużycia) przykładowa odpowiedź czujnika przyspieszenia w pionie (proporcjonalne do siły) zależy w istotny, nieliniowy sposób od prędkości jazdy i od amplitudy, co zostało zbadane przy

prędkości 10, 50 i 100 km/godz. w przypadku długości fali  $\lambda = 50$  mm przy amplitudzie  $a = 10 \mu\text{m}$ . Wyniki symulacji komputerowej w ww. przypadku oraz amplitudy  $a = 30 \mu\text{m}$  zostały podane w pracy [4]. Porównanie wyników wskazuje na istotną różnicę poziomu przyspieszenia, który w przypadku amplitudy  $a = 10 \mu\text{m}$  może być rejestrowany tylko w przypadku prędkości bliskiej prędkości jazdy odpowiadającej częstości rezonansowej kontaktu koło-szyna (rys. 9). Przy prędkości dalekiej od rezonansowej ocena parametrów korugacji jest istotnie utrudniona.



Rys 9. Nierówności szyny i trajektoria środka koła oraz siła kontaktowa przy  $a = 10 \mu\text{m}$

#### 4. Wykorzystanie sygnału wibroakustycznego – sygnał przyspieszenia. Ocena parametru (intensywności) $\lambda$ zależnego od jakości oddziaływania za granicą

W celu oceny jakości oddziaływania układu zestaw kołowy/tor wprowadzono pewien parametr  $\lambda$  związany z intensywnością orbit łożysk zestawów kołowych, co można określić jako miarę kinetycznej energii zaburzeń rejestrowanego sygnału [6, 7]. Badacze z Austrii i Niemiec proponują wyrażać zaburzenia ruchu podstawowego przy stałej prędkości jazdy jako proces przypadkowy zestawu kołowego poprzez transformację Karhunen-Loewe w skrócie (K-L). Mając na przykład do dyspozycji 4 przebiegi przyspieszenia w czasie zależne od wyboru pomiaru. K-L algorytm ocenia stan oddziaływania w  $k$ -tym przedziale jako  $k$ -tą realizację procesu przypadkowego  $x_i$ :

*Transformacja Fouriera*

$$a_k = \frac{1}{T} \int y(t) e^{-jk\omega t} dt$$

*Transformacja Karhunen-Loewe*

$$a_k = \frac{1}{T} \int y(t) \psi_k(t) dt \quad (1)$$

Transformacja ta jest w pewnym sensie podobna do transformacji Fouriera, jednak wykorzystuje funkcje charakterystyczne zależne od sygnału. Parametr jakości ma wymiar  $[\text{m}^2/\text{s}^4]$ . Monitoring przejazdów pojazdów szynowych jest zwykle uzupełniany badaniami symulacyjnymi. Badania tego typu zarówno w zakresie pomiarowym i symulacyjnym, w teorii, jak i w zastosowaniach są kontynuowane.

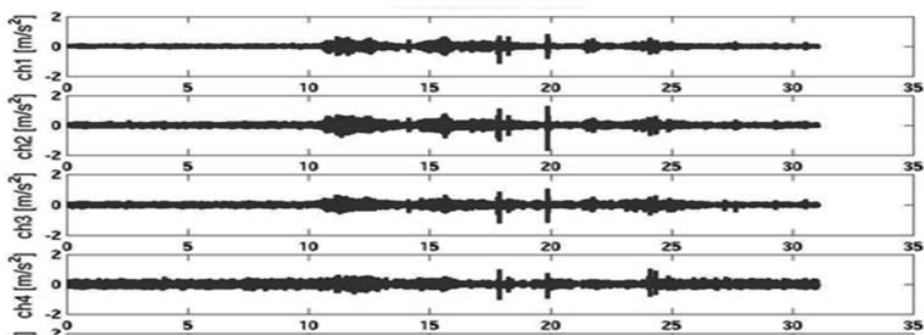
W doświadczalnych i symulacyjnych badaniach niemieckich z wykorzystaniem specjalnego stanowiska ustalono, że zakres  $\lambda \approx 25...40 \text{ m}^2/\text{s}^4$  może być uważany jako przeciętny. Pragniemy podkreślić, że we wspomnianych badaniach symulacyjnych nie uwzględniano zmian sił w kierunku wzdłużnym. Przebieg tych sił w przypadku toczenia się koła na obrzeżu ilustruje stan krytyczny, w którym wartość ilorazu  $Y/Q$  nie jest bliska wartości krytycznej. W badaniach doświadczalnych spotyka się liczne przykłady, w których iloraz  $Y/Q > 2$ , tj. przekracza dopuszczalne granice, a wykolejenie nie następuje. Kryterium wykolejenia wymaga dalszych badań.

Ograniczając badania do wcześniej wymienionych dwóch kierunków jakość oddziaływania podzielono na cztery klasy przedstawione w tab. 1.

Tabela 1. Podział jakości oddziaływania

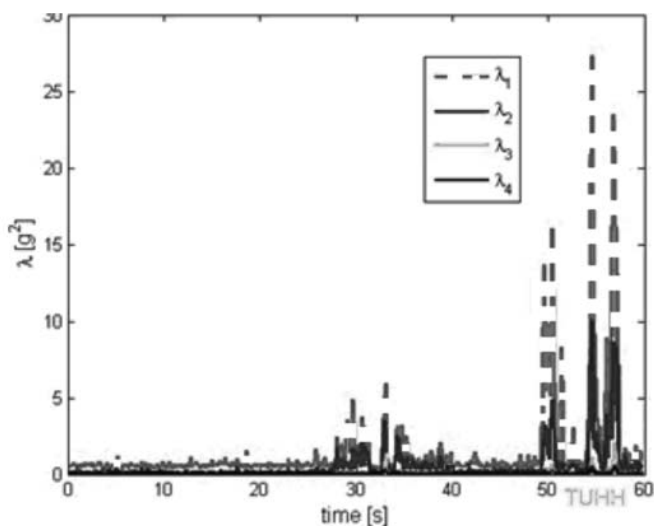
Klasa	Jakość	Wsp. $\lambda$
1	Szanseobly (goldringefonare)	0.5
2	Sansedi/nobale (poodringefonare)	6-25
3	Sansedwajaj (usliciedringefonare)	26-80
4	Sansiwydjeju (oiciedringefonare) obahat	81-ok 100

Wstępna weryfikacja doświadczalna tych propozycji oceny i zastosowania po-  
danego systemu pomiaru przyspieszenia na torach europejskich i krajowych zosta-  
ła również oceniona pozytywnie [7].



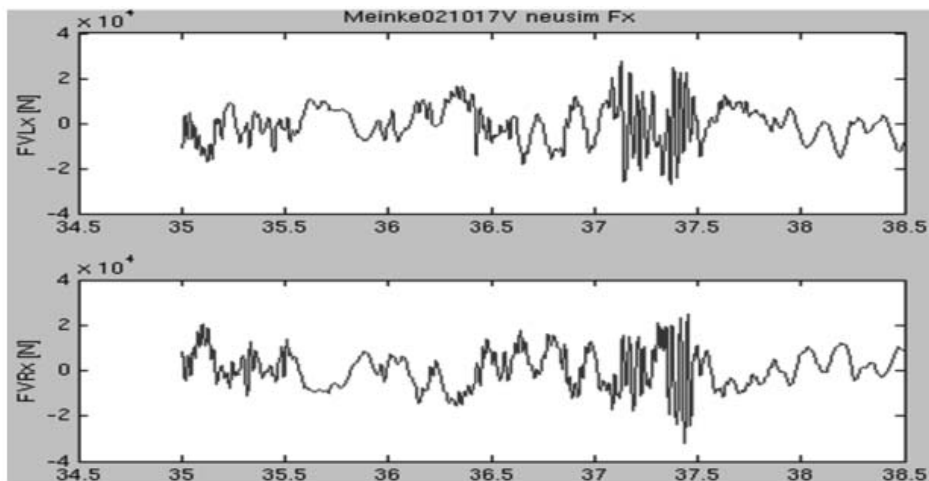
Rys. 10. Przyspieszenia w kierunku osi  $x$  i osi  $z$  mierzona na łożyskach dwóch zestawów kołowych na torze DB





Rys. 11. Rezultaty transformaty K-L wykonanej dla powyższych przebiegów

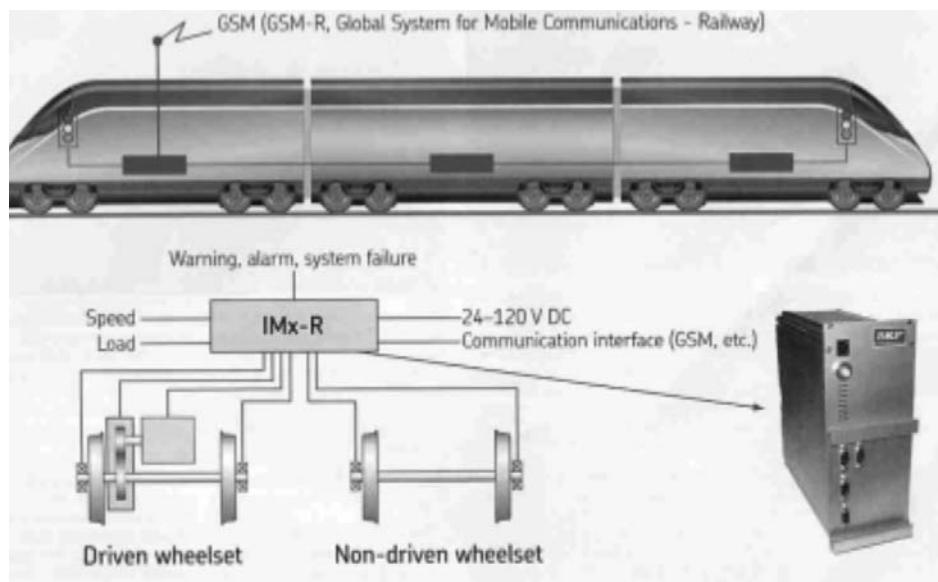
Monitoring przejazdów pojazdów szynowych jest zwykle uzupełniany komputerowymi badaniami symulacyjnymi i badaniami na specjalnie zbudowanych stanowiskach, takich jak stanowisko w Kirchmöser [5]. Przebieg oddziaływania zestawu kołowego w stanie bliskim wykolejenia ilustruje rys. 12. Widoczne są zakłócenia w czasie ok. 37 sek., co wskazuje na kontakt obrzeży obu kół zestawu. Wówczas wpływ sił wzdłużnych decyduje o destabilizacji układu, co nie jest widoczne podczas badania przebiegu zależności  $Y/Q$ .



Rys. 12. Siły oddziaływania w stanie bliskim wykolejenia (w czasie ok. 37 s.) [5]



Rys. 13. Stanowisko DB AG do badania oddziaływania zestaw kołowy/tor w Kirchmöser



Rys. 14. System monitoringu parametrów stanu zestawu kół i toru Firmy SKF

Badania symulacyjne monitoringu dotyczące dynamiki oddziaływania układu zestaw kołowy-tor doprowadziły do powstania specjalistycznych układów monitorujących pojazdy i tor. Na rys. 14 przedstawiony został system monitoringu parametrów stanu Firmy SKF typu IMx-R, który przekazuje informacje o sta-

nie elementów monitorowanych z wykorzystaniem specjalnego systemu przetwarzania danych. Monitorowaniu podlegają: poligonalizacja kół, niewyważenie kół, moment zginający oś, temperatura obudowy łożysk, temperatura pierścieni zewnętrznych łożysk, drgania obudowy oraz drgania świadczące o uszkodzeniu łożysk, lub przekładni napędu, temperatura i stan oleju. Należy jednak podkreślić bardzo wysoki koszt i ograniczoną dostępność systemu Imx-R na rynku.

### 5. Ocena jakościowa badanych zjawisk – monitoring przekroczenia dopuszczalnych poziomów

Jako cechy charakterystyczne zużycia szyn możemy wymienić: wadliwy zarys główki, omawiane już faliste zużycie typu korugacja lub fale poślizgowe, wytarcia spowodowanego obracającym się kołem w trakcie ruszania i inne. Wykrycie wymienionych usterek wymaga częstego próbkowania, zależnego od prędkości jazdy. Podstawą oceny stanu toru będą parametry jakości uprzednio opracowane i uzupełnione podczas badań doświadczalnych. Do parametrów charakteryzujących stan toru należą: parametr transformacji Karhunen-Loewe oraz bardziej istotne, naszym zdaniem, parametry jakości oparte na pomiarze gęstości widmowej składowych przyspieszenia i składowych zrywu (pochodnej przyspieszenia względem czasu).

Za parametr (wskaźnik) liczbowy oceny stanu toru kolejowego przy określonej prędkości jazdy zaproponowano wielkość oznaczoną niżej przez  $W_{tl}$  – podobnie jak w ocenie spokojności jazdy – którą w przypadku opisu toru z wykorzystaniem gęstości widmowych wyraża zależność:

$$W_{tl} = c_{tl} \left[ \int_0^{\infty} S_a(\omega) \omega^{-2/3} d\omega \right]^{0,15} \quad (2)$$

gdzie:  $c_{tl}$  oznacza stały współczynnik, a  $S_a(\omega) [m^2 s^{-3}]$  jest gęstością widmową przyspieszeń  $a(t)$  punktu poruszającego się po nierównościach toru z prędkością  $v$ .

Zaproponowane wyżej wyrażenie określające parametr  $W_{tl}$  stanowi uogólnienie przypadku stacjonarnych, ergodycznych procesów przypadkowych znanego wyrażenia charakteryzującego wskaźnik spokojności jazdy  $d$  w przypadku drgań harmonicznym, uwzględniającego energię kinetyczną punktu materialnego odniesioną do jego masy oraz pochodną przyspieszenia względem czasu (zrywu), [9].

Przyjmując aproksymację gęstości widmowej w następującej postaci:

$$S_w(\omega) = \frac{\sigma_w^2 \sqrt{\pi}}{\sum_{j=1}^n \delta_j} \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{2|\alpha_j|} \left\{ \exp \left[ -\left( \frac{\beta_j - \omega}{2\alpha_j} \right)^2 \right] + \exp \left[ -\left( \frac{\beta_j + \omega}{2\alpha_j} \right)^2 \right] \right\} \quad (3)$$

przy zmienionych w analizie numerycznej parametrach. W przykładzie zakładamy, że współczynniki podane niżej w tabeli 2 dotyczą gęstości widmowej  $S_w(\omega) = S_{w_e}(\omega)$  nierówności toru kolejowego przy  $\sigma_w = 0,006434$  m oraz  $n = 5$ . Wskaźnik  $e$  informuje, że wielkość dotyczy prędkości eksperymentu  $v_e$ . Wyznaczone współczynniki dotyczą prędkości jazdy  $v = v_e = 120$  km/h.

Tabela 2. Wartości obliczonych parametrów

$j$	1	2	3	4	5
$\delta_j$	0,97488	-0,13298	0,077201	0,049961	0,030936
$\alpha_j$	2,4607	1,6953	0,32253	10,003	0,58839
$\beta_j$	0,78870	3,7880	8,5167	0,0059547	16,241

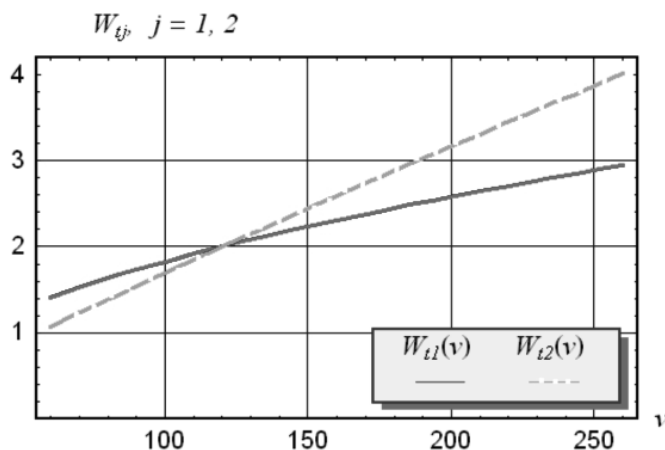
Za następny parametr liczbowy oceny stanu toru kolejowego proponujemy wielkość oznaczoną niżej przez  $W_{t2}$ , uwzględniającą pochodną przyspieszenia względem czasu. Zależnością na ten wskaźnik oceny jest wyrażenie:

$$W_{t2} = c_{t2} \left[ \int_0^{\infty} S_a(\omega) \omega^2 d\omega \right]^{0,15} \quad (4)$$

Powyższe wyrażenie można przedstawić w postaci nie wymagającej wyznaczenia funkcji gęstości widmowej:

$$\left[ \frac{1}{T} \int_0^T \dot{a}^2(t) dt \right]^{0,15} \quad (5)$$

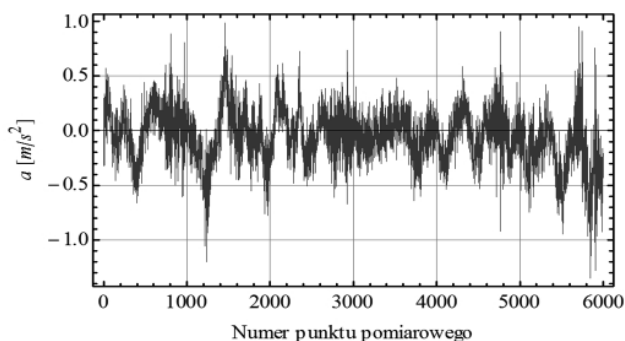
W analizie numerycznej dotyczącej rozpatrywanego toru założono przykładowo, że przy prędkości jazdy 120 km/h wartości wskaźników są równe liczbie 2, a następnie oceniono szacunkowo wpływ zmiany prędkości jazdy na ich wartości. Zestawienie zależności wartości wskaźników  $W_{tj}$ , ( $j = 1, 2$ ), od prędkości jazdy  $v$  {km/h} przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Zależności wartości wskaźników od prędkości jazdy  $v$  {km/h}

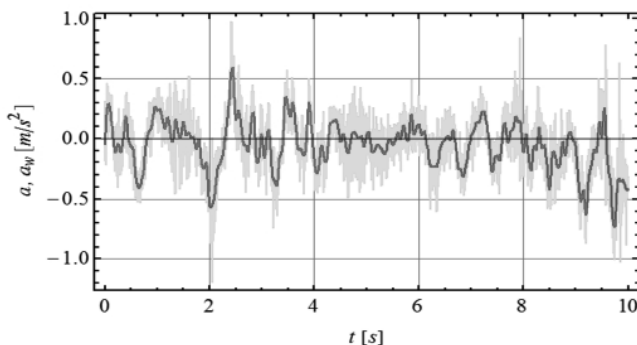
W badaniach eksperymentalnych na torze kolejowym ocenianym jako bardzo dobry pomierzono w szczególności przyspieszenia pionowe na korpusach łożysk zestawów. Prędkość jazdy wynosiła około 67 km/h i była w przybliżeniu stała. Odstęp czasu pomiędzy dwoma sąsiednimi pomiarami był równy 0,001667 s, a przebyta w tym czasie droga równa około 32 mm. Zarejestrowane wartości przyspieszeń  $a$  [ $m/s^2$ ] w kolejnych punktach pomiarowych połączonych na wykresach linią łamaną przedstawia rys. 16.

Do analizy wybrano początkowy fragment przebiegu tych przyspieszeń zarejestrowanych w czasie wynoszącym 10 s. Przebieg zmian wartości przyspieszeń w kolejnych punktach pomiarowych świadczył o zaburzeniu tych zmian w czasie. Za przyczynę tych zaburzeń można uznać – z dużym prawdopodobieństwem – skorugowane powierzchnie toczone szyn. Funkcja przyspieszeń od czasu została przedstawiona w postaci sumy funkcji przebiegu wygładzonego  $a_w(t)$  i funkcji przebiegu zaburzonego  $a_z(t)$ , tj.:  $a(t) = a_w(t) + a_z(t)$ .



Rys. 16. Zarejestrowane wartości przyspieszeń

W wyniku analizy numerycznej uzyskanych danych, w pierwszej kolejności – za pomocą odpowiednio opracowanych procedur – usunięto te zaburzenia i wyznaczono nowy, wygładzony przebieg przyspieszeń. Przebieg ten oraz wyodrębnione zaburzenia przedstawiają wykresy zamieszczone na rys. 17.



Rys. 17. Wygładzony przebieg przyspieszeń oraz wyodrębnione jego zaburzenia

Na podstawie interpolacyjnej funkcji sklepanej opisującej wygładzony przebieg przyspieszeń  $a_w(t)$  określona została numerycznie jej pochodna względem czasu, która następnie pozwoliła wyznaczyć wskaźnik oceny toru wyrażeniem przedstawionym powyżej. Otrzymano wartość  $W_{r2} = 1,20$ , co potwierdza wstępną ocenę toru jako bardzo dobry, podaną przez przeprowadzających wspomniany eksperyment.

Reasumując należy stwierdzić przydatność proponowanej metody do monitorowania stanu pojazdu i toru. Propozycję wskaźnika jakości toru należy traktować jako wstępną oraz wymagającą dalszych badań i weryfikacji doświadczalnej. Autorzy zamierzają kontynuować te badania, a uzyskane wyniki ogłosić w następnym komunikacie. Na uwagę zasługuje propozycja wykorzystania wysokoczęstotliwościowego przebiegu do oceny falistego zużycia.

## Literatura

- [1] Bogacz, R., Konop, J., Meinke, P., Reimann, M., *Monitoring the rolling quality of rail-bus wheelsets*. Präsentation im Eureka-Projekt "Footprint", E! 2486, Brüssel, 2006.
- [2] Bogacz R., Meinke P., On evaluation of wheel sets and railway track quality. Scientific papers of Techn. Univ. Radom TRANSPORT 2(24), 2005.
- [3] Bogacz R. Chudzikiewicz A. Meinke, P., Ocena jakości toru kolejowego na podstawie pomiarów wielkości fizycznych mierzonych na korpusie łożysk zestawów kołowych. (Evaluation of track quality on the base of physical quantities measured on the bearings of wheelsets). MONIT Seminar Warsaw University of Technology, November 2009, pp. 109-113.
- [4] Bogacz, R., Kowalska, Z., Computer simulation of the interaction between a wheel and a corrugated rail. European Journal of Mechanics - A/ Solids, 20, 673-684, 2001,
- [5] Meinke, P., Laufzustands-Monitoring von Eisenbahn-Radsätzen, Schlußbericht zum BMBF-geförderten Verbundvorhaben, (C+K GmbH, Technische Universität Hamburg-Harburg. Universität Hannover, DB AG: Systemtechnik Kirchmöser), „Laufzustandsmonitoring von Eisenbahnfahrzeugen“, Starnberg, 2005.
- [6] Meinke, P., Stephanides, J., Entstehung von Schlupfwellen – Erkenntnisse aus den Versuchen im Brixental zur Modellierung und Simulation von Schlupfwellen. Bericht IAT – 048/1 des ÖBB-Pprojektes OBO - Optimierter Bogenoberbau.
- [7] Gloesmann, P., Kreuzer, E., Nonlinear System Analysis with Karhunen-Loève Transform. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [8] Meinke, P., Monitoring of the State Conditions of Railway Vehicles by Satellite Communication. 4th International Conference on Transport Systems Telematic, Katowice, 2004.

- [9] Grzyb A., Analytical method of a rail vehicle smooth running estimation. Rail vehicles – selected problems. Monograph 41, T. Kościuszko Technical University of Cracow, 31–44, 1986.
- [10] Bogacz R., Grzyb A., Tokaj P., State monitoring of vehicle and track on basis of measurement of wheel-set bearing casing acceleration. Rail Vehicle Conference. Krakow, 2010. pp. 37-49.
- [11] ERRI: Schlussbericht des EU-Vorhabens DYSAF, Utrecht, 2003.

*Praca powstała w wyniku realizacji projektu: Monitorowanie Stanu Technicznego Konstrukcji i Ocena Jej Żywotności MONIT, finansowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka ze środków MNiSzW.*

